

# Технология и техника геологоразведочных наук

УДК 624.131

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЧНОСТИ МЕТОДОМ КРУЧЕНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ ОБРАЗЦОВ

Л.А. Строкова

Технический университет, г. Мюнхен, Германия

E-mail: geyer3@mail.ru

*Изложены результаты лабораторных исследований параметров прочности глинистых грунтов методом кручения кольцевых образцов. Испытания проводились при постоянной скорости деформации и непрерывной регистрации вертикальных и горизонтальных деформаций и напряжений. Установлена зависимость показателей прочности от скорости приложения касательных усилий.*

Одним из характерных видов деформации глинистых грунтов в природных условиях является простой сдвиг. Сопротивление пород сдвигу является основным прочностным показателем. По нему рассчитывают основания и земляные сооружения по первому предельному состоянию, проверяют устойчивость откосов и естественных склонов, вычисляют давление грунта на ограждающие конструкции. В настоящее время разработано большое число методов и приборов, позволяющих определять прочность пород на сдвиг. Среди этих методов наиболее распространенными являются срез со сжатием, плоскостной срез, кольцевой срез, срез методом скашивания, срез в условиях трехосного сжатия и вращательный срез. Срезные приборы имеют очень простую конструкцию и удобны в эксплуатации. Однако они обладают рядом существенных недостатков [1], основными из которых являются: 1) протекание деформации в узкой зоне сдвига; 2) неравномерность распределения касательных напряжений в плоскости среза вследствие их передачи к образцу по его боковой поверхности и горизонтальным плоскостям; 3) концентрация касательных напряжений у краев образца, переменность площади среза; 4) ограниченность деформации; 5) изменчивость величины зазора между обоймами; 6) неполная передача касательных напряжений на образец; 7) смятие образца в торцах и т. д.

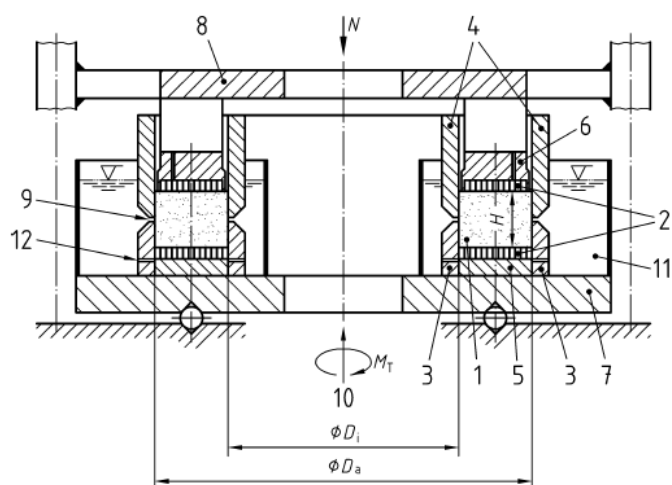
Приборы кольцевого среза свободны от многих указанных недостатков, например, они допускают большие деформации по всей площади образца при неизменной площади сдвига, минимальное смятие образца в торцах. Основным общим недостатком всех срезных приборов, в том числе и кольцевых, является то, что на них невозможно определить высоту зоны сдвига и вычислить величину относительной деформации сдвига  $\gamma$ ; сдвиг протекает в стесненных условиях. Вследствие этого

срезные приборы непригодны для определения деформационных характеристик грунтов, они могут быть использованы только для определения их прочностных характеристик — сопротивления сдвигу. Т. к. опыты на кольцевой срез и кручение имеют явное преимущество перед опытами на трехосное сжатие в смысле определенности напряженного состояния образца, неслучайно многие исследователи рекомендуют изучение прочностных и реологических свойств глинистых грунтов выполнять на приборах кольцевого среза, методом кручения полых и сплошных образцов [1–5].

Цель настоящих исследований — установить влияние скорости приложения касательных усилий на величину параметров прочности при испытании грунтов методом кручения.

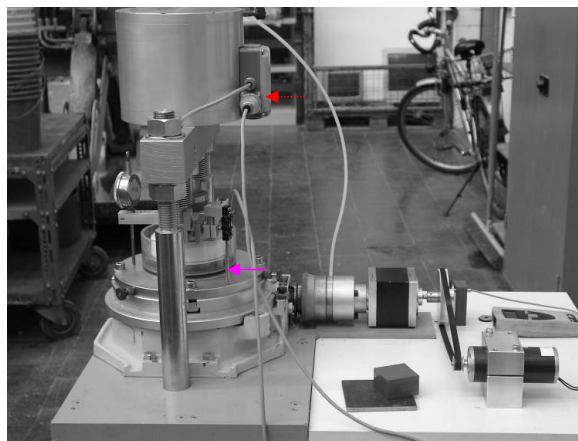
Для определения параметров прочности использовался прибор одноплоскостного кольцевого среза, разработанный в Центре Геотехники Технического университета г. Мюнхена весной 2007 г. (рис. 1). Образец грунта срезается по кольцевой поверхности в результате кручения нижней кольцевой обоймы относительно неподвижной верхней. Вертикальное давление на образец передается через верхний штамп. Крутящий момент прикладывается к нижней обойме [6]. Образец срезается по заранее фиксированной плоскости. Проведение опытов сопровождается цифровой регистрацией напряжений и деформаций и хранением этих данных в компьютере. Отличительная особенность этого прибора — возможность свободного перемещения нижней обоймы вместе с образцом во время кручения, без появления значительных сил трения по внутренней и внешней боковым поверхностям образца.

Для измерения действующих касательных усилий в этом приборе используется датчик силы Z6 фирмы Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH с разрешающей



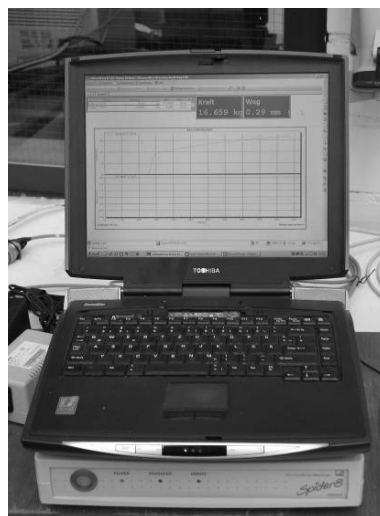
**Рис. 1.** Прибор кольцевого среза: 1) образец грунта; 2) дренажные кольца; 3) нижнее боковое кольцо; 4) верхнее боковое кольцо, имеющее возможность свободно вращаться по 3 и 6; 5) нижний рифленый штамп; 6) верхний рифленый штамп для приложения вертикальной нагрузки; 7) нижняя тарелка для передачи крутящего момента; 8) верхняя тарелка служит для передачи вертикальной нагрузки  $N$  перпендикулярно плоскости среза, жестко закрепленная для предотвращения вращения верхней обоймы и опрокидывания; 9) плоскость среза; 10) механизм кручения нижней тарелки вокруг вертикальной оси, крутящий момент  $M_T$ ; 11) емкость для увлажнения образца; 12) дренажные отверстия

способностью 10 г. Для регистрации вертикальных перемещений используется потенциометрический датчик перемещений Megatvon CLP-13/25 с разрешающей способностью 0,01 мм (рис. 2). Запись измерений обеспечивается программным комплексом «Catman easy». Вид интерфейса — на рис. 3.



**Рис. 2.** Датчики измерения силы и перемещений

Для изготовления образца кольцевой формы используются два режущих кольца: один диаметром 6,8 см и высотой 2 см с внешней режущей кромкой, второй диаметром 4,8 см и высотой 7 см с внутренней режущей кромкой и направляющим устройством. Для выдавливания ядра внутренним режущим кольцом служит пресс (рис. 4). Выдавливание образца кольцевой формы в прибор осуществляется при помощи металлического кольца, имеющего аналогичные размеры с изготовленным образцом грунта.



**Рис. 3.** ПК для регистрации измерений

После изготовления образца кольцевой формы определяются его размеры, масса, влажность. Затем образец грунта помещается в прибор. Устанавливаются датчики перемещений. Для предотвращения высыхания образца емкость из полиметилметакрилата наполняется водой.

Было проведено три серии испытаний суглинка тугопластичного, при этом переменными величинами являлась скорость среза. Для испытаний были подготовлены образцы одинаковой плотности 1,815 г/см<sup>3</sup> и влажности 13,6 %. Испытания проводились по схеме «консолидированно-дренированный срез» на переуплотненных образцах, т. е. вна-

чале к образцам прикладывалась максимальная нагрузка, равная  $150 \text{ кН/м}^2$ , выдерживалась 24 ч. После консолидации проводился сдвиг при величине вертикальных нагрузок 50, 100 и  $150 \text{ кН/м}^2$ .

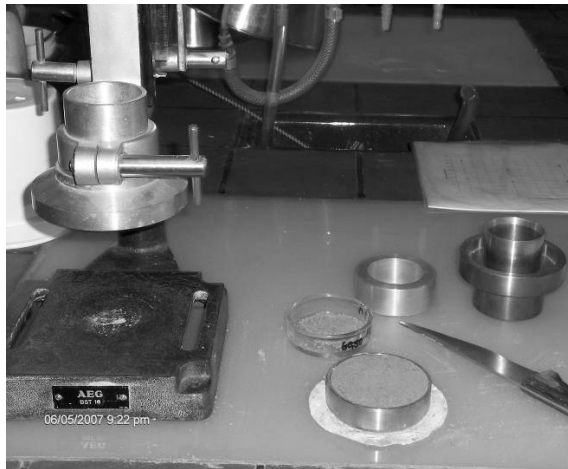


Рис. 4. Пресс и режущие кольца



Рис. 5. Установка образца грунта в приборе кольцевого среза

Срез осуществлялся с постоянной во времени скоростью среза  $\dot{\gamma}$ , равной 1,0; 0,5 и 0,1 мм/мин – так называемое кинематическое нагружение, при котором касательная нагрузка прикладывается непрерывно. Сдвиг продолжался от 2 до 14 ч до поворота нижней тарелки на  $100^\circ$ .

При проведении испытаний каждые 10 с регистрировались: нормальное  $\sigma$  и касательное  $\tau$  напряжения, величина вертикальных и горизонтальных деформаций образца от действия приложенной нагрузки как в ходе и консолидации, так и сдвига. По результатам испытаний определялись максимальное (пиковое)  $\tau_{\max}$  и остаточное  $\tau_{\text{rest}}$  касательные напряжения, углы внутреннего трения  $\varphi$  и сцепление  $c$  при максимальном и остаточном касательных напряжениях. Результаты сдвиговых испытаний грунта приведены в таблице.

По результатам сдвиговых испытаний четко прослеживается зависимость величины касательных напряжений от величины нормальных напряжений. Приращение касательных напряжений составляет 70...80 % при удвоении приложенных нор-

мальных напряжений. Увеличение скорости среза с 0,1 до 1,0 мм/мин дает уменьшение максимального касательного напряжения на 11,1 %.

Таблица. Параметры сопротивления пород сдвигу

Нормальное напряжение, $\sigma$ , $\text{кН/м}^2$	Максимальное касательное напряжение, $\tau_{\max}$ , $\text{кН/м}^2$	Остаточное напряжение, $\tau_{\text{rest}}$ , $\text{кН/м}^2$	Вертикальная деформация при сдвиге, мм	Скорость среза, мм/мин	Угол внутреннего трения, $\varphi_{\max}$ , $^\circ$	Сцепление, $c_{\max}$ , $\text{кН/м}^2$	Угол внутреннего трения, $\varphi_{\text{rest}}$ , $^\circ$	Сцепление, $c_{\text{rest}}$ , $\text{кН/м}^2$
50	15,314	14,232	0,45	1,0	13,07	12,47	12,42	4,72
100	28,609	25,551	0,82					
150	40,638	38,53	1,03					
50	16,915	13,321	0,21	0,5	13,94	17,54	11,22	5,16
100	30,352	27,508	0,58					
150	43,959	39,420	1,10					
50	17,889	16,892	0,22	0,1	14,04	30,1	10,69	6,25
100	32,789	26,248	0,38					
150	44,918	39,953	0,90					

После завершения сдвига определялась влажность образца (рис. 6).



Рис. 6. Образец грунта после среза и высушивания

Сопоставление данных о величине сопротивления грунтов сдвигу, полученных при испытаниях в приборах трехосного сжатия и кручения кольцевых образцов, показывает хорошее совпадение данных по величине сцепления и некоторое расхождение по углу внутреннего трения. Угол внутреннего трения, определенный методом кручения, в среднем на  $5^\circ$  выше, чем при трехосных испытаниях.

Полученные результаты экспериментальных исследований показали, что скорость среза оказывает существенное воздействие на структуру и свойства глин, отражаясь в показателях прочности. Возрастание прочности и сопротивления сдвигу грунтов при уменьшении скорости приложения касательных напряжений обусловлено рассеиванием во времени избыточного давления в поровой воде, достигающего максимума в момент приложения вертикальной нагрузки или через некоторое время после него. Поэтому планируется дальнейшее усовершенствование прибора для определения порового давления.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Месчан С.Р. Начальная и длительная прочность глинистых грунтов. – М.: Недра, 1978. – 207 с.
2. Bishop A.W., Green G. The influence of end restraint on the compression strength of a cohesionless soil // Géotechnique. – 1965. – V. 15. – № 3. – P. 243–266.
3. Dounias G.T., Potts D.M. Numerical analyses of drained direct and simple shear tests // Journal of Geotechnical engineering, ASCE. – 1993. – V. 119. – № 12. – P. 1870–1891.
4. Frydman S., Talesnick M. Development of strain during monotonic shear of soft clay // Journal of Geotechnical engineering, ASCE. – 1992. – V. 118. – № 5. – P. 704–725.
5. Lade P. Torsion shear apparatus for soil testing // Laboratory shear strength of soil, ASTM, STP 740. – 1981. – P. 145–163.
6. DIN 18137-3. September 2002. Bestimmung der Scherfestigkeit. – 2002. – S. 33.

Поступила 25.06.2007 г.

УДК 624.131

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЕДАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПРОХОДКЕ ТУННЕЛЯ ЩИТОВЫМ СПОСОБОМ

Л.А. Строкова

Технический университет, г. Мюнхен, Германия  
E-mail: geyer3@mail.ru

Изложены результаты моделирования оседания поверхности в результате проведения горных работ щитовым способом для строительства линии метрополитена U-8-Nord г. Мюнхена. Для верификации расчетной модели служили замеры оседания поверхности по окончании горных работ. Выбрана модель грунта, наиболее достоверно описывающая оседание земной поверхности при проходке. Определены факторы, контролирующие величину осадки поверхности. Деформации грунта, связанные с осушением массива при выполнении горных работ не учитывались.

Одним из характерных видов деформации грунтов при проходке горных выработок является оседание дневной поверхности (рис. 1). С целью минимизации повреждений существующих зданий и фундаментов на поверхности земли, необходимо прогнозировать эти эффекты и принять соответствующие меры. Р. Пек в 1969 г. предложил для математического описания оседания поверхности [1] использовать формулу Гаусса для нормального распределения

$$S_v(x) = S_{v,\max} e^{-\frac{x^2}{2i_x^2}},$$

где  $S_{v,\max}$  – максимальная осадка поверхности над осью туннеля,  $i_x$  – расстояние до точки перегиба кривой оседания поверхности, соответствующее стандартному отклонению в уравнении Гаусса.

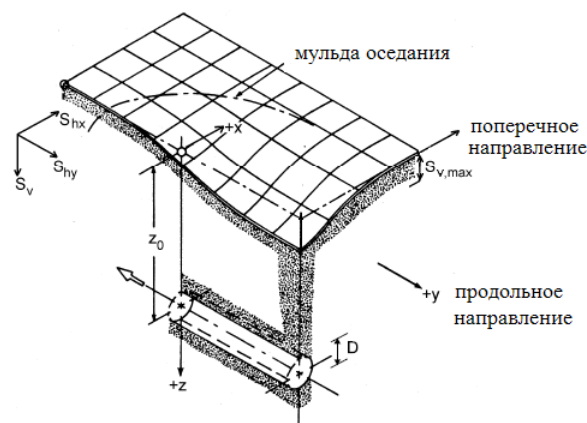


Рис. 1. Геометрия оседания поверхности, вызванной проходкой туннеля [2]

Типичная поверхность оседания в поперечном направлении показана на рис. 2. Область выше кривой оседания задается уравнением

$$V_s = \int_{-\infty}^{\infty} S_v \cdot dx = \sqrt{2\pi} \cdot i_x \cdot S_{v,\max},$$

где  $V_s$  – объем осевшего грунта над туннелем, в результате проведения горных работ, теоретически равен величине сжатия сечения туннеля  $V_t$  (рис. 2) на единицу длины проходки.

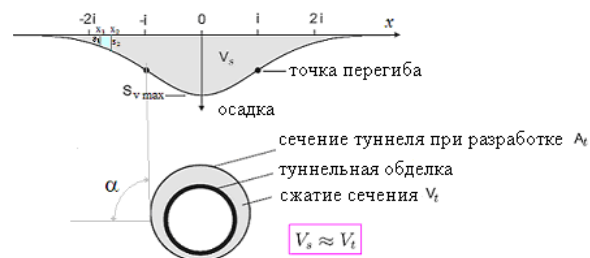


Рис. 2. Основные характеристики, используемые в расчете [4]

Для оценки оседания поверхности использовался метод конечных элементов, реализованный в программе PLAXIS которая позволяет моделировать процессы экскавации грунта, возведения обделки туннеля [3]. Расчеты выполнялись для строящейся линии метрополитена U-8-Nord г. Мюнхена. Для верификации модели служили данные натурных наблюдений оседания поверхности на уже законченном участке метро, выполненные сотрудниками технического университета под руководством И. Филлибека. Максимальная величина оседания